

## CFA/VISHNO 2016

**Furtivité acoustique des véhicules blindés terrestres -  
Modélisation à partir de mesures en champ proche et du  
bruit de fond**A. Khelifi<sup>a</sup> et D. Cosson<sup>b</sup><sup>a</sup>NEXTER SYSTEMS, 11 allée des Marronniers, 78022 Versailles Cedex, France<sup>b</sup>DGA Techniques Terrestres, Rocade Est - Echangeur de Guerry, 18021 Bourges Cedex,  
France

a.khelifi@nexter-group.fr



LE MANS

La non-déteçtabilité acoustique à l'oreille humaine suppose la non détection du bruit d'une source sur toute la gamme du spectre fréquentiel audible. Il y a deux façons de ne pas être déteçtable par un individu :

- être en dessous de son seuil de déteçtion,
- être masqué par un bruit de fond.

Ce phénomène acoustique est un enjeu important pour la protection des soldats embarqués dans leurs véhicules, en opération.

Nexter Systems a mis en place un outil, validé avec la DGA Techniques Terrestres, qui permet à partir de mesures en champ proche sur des véhicules blindés d'estimer la distance limite de non déteçtabilité à l'oreille humaine.

Ainsi, à défaut de pouvoir caractériser les véhicules à grandes distances avec des niveaux de bruit de fond inaccessibles, cet outil permet de réaliser des mesures à courtes distances qui sont ensuite propagées par des modèles acoustiques. Plusieurs méthodes existent et seront développées dans cette publication. Elles prennent en compte la divergence géométrique, l'absorption atmosphérique et l'effet de sol. La perception de l'oreille humaine est également prise en considération. On peut aussi y intégrer d'autres facteurs comme les obstacles ou la végétation.

Quelques résultats de simulation seront présentés dans cette publication, bien entendu sans diffusion des valeurs sensibles.

## 1 Introduction

Une méthode empirique relativement fiable serait de placer un véhicule blindé dans une zone au bruit de fond faible, et de faire des mesures à grandes distances. Cela est difficilement réalisable, car un bruit de fond faible est difficile à obtenir en extérieur, et des terrains dégagés assez vastes sont rares en France. Avoir un bâtiment isolé acoustiquement et suffisamment grand pour faire ce type de mesures à grandes distances n'est pas réalisable. De plus, il y a une certaine ambiguïté sur le rapport signal/bruit lorsqu'on s'approche du point où l'intensité du signal acoustique devient proche du bruit de fond. Comment savoir si le son vient de la source, ou du bruit de fond ? Généralement, un écart de 10 dB entre le signal et le bruit est nécessaire (le bruit de fond étant souvent assez aléatoire).

Aussi, il est plus aisé de mesurer le bruit à courtes distances puis de calculer le niveau propagé par des modèles acoustiques fiables, ce qui permet d'une part de s'affranchir de mesures à grandes distances, et d'autre part de pouvoir parfaitement distinguer lors des acquisitions la source et le bruit de fond (un véhicule étant beaucoup plus bruyant que le bruit de fond à courte distance).

Cette publication présente quelques modèles intégrés dans un outil de propagation acoustique et de détermination de distance de non déteçtabilité, développé au sein de Nexter Systems, validé avec l'outil MDA (Modèle de Déteçtion Acoustique) de la Direction Générale de l'Armement (DGA), permettant d'évaluer les performances en furtivité acoustique des Blindés Terrestres et ainsi d'agir sur la conception silencieuse des produits le plus tôt possible.



Figure 1 : Véhicule Blindé de Combat d'Infanterie (VBCI)

## 2 Propagation acoustique

La propagation acoustique est un procédé permettant d'estimer le niveau de bruit à une certaine distance. Plusieurs méthodes existent et sont détaillées dans divers référentiels : la norme ISO 9613 [1], le modèle d'Aberdeen [2], le modèle Nord 2000 [3], Harmonoise, NMPB, etc...

Deux méthodes vont être décrites ici. La première étant celle issue de l'ISO 9613 [1], la norme de référence de calcul de propagation acoustique, utilisée dans divers domaines et programmée dans de nombreux logiciels commerciaux dont ceux dédiés à l'acoustique environnementale.

La seconde méthode a été développée par l'Human Engineering Laboratory d'Aberdeen (MD, USA) [2], au sein de l'Aberdeen Proving Ground, un terrain d'essai de l'US Army. Le modèle dit d'Aberdeen a ensuite été repris dans une norme militaire américaine nommée MIL-STD-1474C (norme actuelle : MIL-STD-1474D [4]) qui fournit les niveaux acoustiques limites pour ne pas être déteçtable à l'oreille humaine, à une certaine distance et dans des conditions d'essais bien spécifiques.

### 3 ISO 9613

L'ISO 9613 propose une méthode simple permettant de calculer l'atténuation du son à partir d'un son mesuré à courte distance. Cette norme propose un modèle prenant en compte les paramètres suivants :

- les conditions atmosphériques (température, humidité, ...),
- le sol (réflexion, impédance),
- les obstacles, ...

On définit le niveau de bruit au récepteur par la relation suivante :

$$L_R(f) = L_S(f) - A(f) \quad (1)$$

Où : - f est la fréquence centrale de la bande d'octave,  
-  $L_S$  est le niveau de bruit de la source dans la bande d'octave,  
- A est l'atténuation dans la bande d'octave.

Cette atténuation A (dB) se décompose en une somme d'atténuations générées par les différents mécanismes pris en compte :

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (2)$$

Avec :

- $A_{div}$  : atténuation générée par la divergence géométrique,
- $A_{atm}$  : absorption atmosphérique,
- $A_{gr}$  : effet du sol,
- $A_{bar}$  : atténuation due aux obstacles,
- $A_{misc}$  : atténuation due à divers phénomènes (végétation, obstacles, ...).

#### 3.1 Divergence géométrique

Considérons une source omnidirectionnelle sphérique. Celle-ci va rayonner dans toutes les directions, et l'intensité reçue par un récepteur va diminuer au fur et à mesure que la sphère de propagation (et donc la surface de répartition) s'agrandit. Etant donné que la relation entre le rayon r (distance) et la surface de la sphère est une relation au carré ( $r^2$ ), on écrit dans ce cas l'atténuation  $\Delta L$  (entre les niveaux  $L_1$  et  $L_2$ ), sous la forme :

$$\Delta L = 10 \log \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \quad (3)$$

Ainsi pour une source ponctuelle en champ libre, on utilise la relation suivante pour caractériser l'atténuation due à la divergence géométrique,  $A_{div}$  :

$$A_{div} = \left[ 20 \log \left( \frac{d}{d_m} \right) \right] \quad (4)$$

Avec : - d : la distance source-récepteur (m),  
-  $d_m$  : la distance de mesure (m).

#### 3.2 Absorption atmosphérique

L'absorption atmosphérique est due à la dissipation d'énergie par les molécules d'air. Elle est définie comme suit :

$$A_{atm} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (5)$$

Avec : -  $\alpha$  le coefficient d'atténuation atmosphérique (dB/km),  
- d la distance source-récepteur (m).

$\alpha$  est dépendant des conditions atmosphériques (température et humidité). La norme ISO 9613-1 fournit des tables pour des températures allant de -20°C à 50°C et une humidité comprise entre 10 à 20%, par bandes de tiers d'octaves.

La figure ci-dessous montre l'impact, non négligeable, de l'évolution de certains paramètres sur l'absorption atmosphérique (dB), en fonction de la fréquence (f). L'impact de l'effet de sol (dur/ mou), sur lequel nous reviendrons par la suite, est aussi intégré.

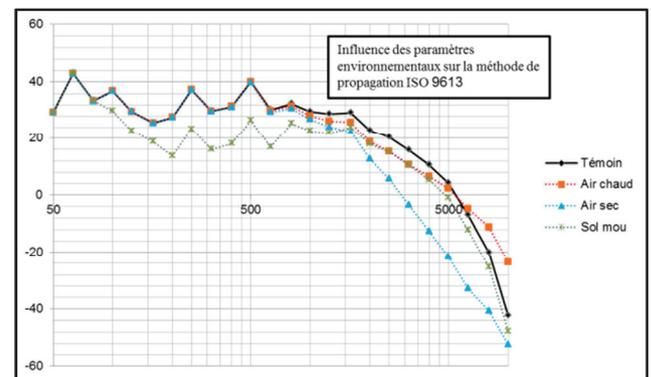


Figure 2: influence de paramètres environnementaux sur l'atténuation du bruit suivant l'ISO 9613-1

#### 3.3 Effet de sol

L'effet de sol résulte des interférences entre le son qui provient directement de la source, et le son qui est réfléchi par le sol (impédance acoustique).

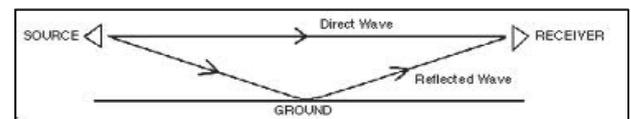


Figure 3: Trajet d'une onde acoustique

Cette atténuation est calculée en divisant l'espace séparant la source du récepteur en trois parties auxquelles on affecte pour chacune d'entre elle une atténuation :

- la zone de la source d'atténuation  $A_s$  qui va de la source à la distance  $30h_s$
- la zone du récepteur d'atténuation  $A_r$  qui va de la source à la distance  $30h_r$
- la zone centrale d'atténuation  $A_m$  qui se situe entre les deux zones précédentes, si elle existe.

Avec :  $h_s$  = hauteur de la source,  $h_r$  = hauteur du récepteur

En fonction de ces différentes distances et hauteurs, on en déduit les valeurs de  $A_s$ ,  $A_r$  et  $A_m$  par bandes d'octave

(de 63Hz à 8kHz), et on obtient au final l'effet de sol pour chaque bande d'octave :

$$A_{gr} = A_s + A_m + A_r \tag{6}$$

La norme ISO 9613 définit également une constante G (comprise entre 0 et 1), liée à l'impédance acoustique du sol (mou à dur), pour chacune des zones. Pour simplifier le modèle, une unique valeur de G est prise en compte, sur le type de sol considéré. Ce qui est en adéquation avec les conditions de caractérisation de nos véhicules.

Le tableau ci-dessous fournit quelques relations entre ces différents paramètres qui sont bien détaillés dans la norme.

Nominal midband frequency	$A_s$ or $A_1^{(1)}$	$A_m$
Hz	dB	dB
63	-1,5	-3q <sup>2</sup>
125	-1,5 + G × d'(h)	-3q(1 - G <sub>m</sub> )
250	-1,5 + G × b'(h)	
500	-1,5 + G × c'(h)	
1 000	-1,5 + G × d(h)	
2 000	-1,5(1 - G)	
4 000	-1,5(1 - G)	
8 000	-1,5(1 - G)	

NOTES

$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times h^2})$

$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$

$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$

$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,3h^2} (1 - e^{-d_p/50})$

1) For calculating  $A_s$ , take  $G = G_s$  and  $h = h_s$ . For calculating  $A_1$ , take  $G = G_r$  and  $h = h_r$ . See 7.3.1 for values of G for various ground surfaces.

2)  $q = 0$  when  $d_p \leq 30(h_s + h_r)$

$q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p}$  when  $d_p > 30(h_s + h_r)$

where  $d_p$  is the source-to-receiver distance, in metres, projected onto the ground planes.

Figure 4: Prise en compte de l'effet de sol par l'ISO 9613-2

### 3.4 Autres paramètres d'atténuation

La norme ISO 9613 prend aussi en compte le calcul de l'influence d'obstacles entre la source et le récepteur, mais dans notre modèle de non-défectabilité, on considère qu'il n'y a pas d'obstacle sauf cas particuliers, conformément à la méthodologie décrite dans la MIL-STD-1474D. La végétation est aussi prévue par le modèle (« foliage »), mais elle est considérée comme très dense, et apporte une atténuation supplémentaire significative. Cela reviendrait à être dans une forêt dense ou une jungle. Le calcul est inclus, en option, dans le programme informatique mis en place, mais il s'agit d'une approximation très grossière (au regard des terrains habituellement considérés) de l'effet de la végétation sur la propagation acoustique, et ne sera donc pas décrit ici.

Cette démarche, suivant la norme ISO 9613, est schématisée dans la figure ci-dessous.

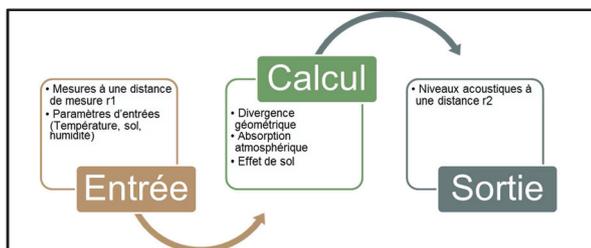


Figure 5 : Schéma de la démarche suivant l'ISO 9613

## 4 Modèle d'Aberdeen

Le modèle d'Aberdeen est similaire, dans la démarche, à celui de l'ISO 9613, mais la différence majeure se situe sur l'effet de sol, qui est calculé via la méthode d'Ingard de propagation d'une onde sphérique près d'une surface (le sol) dont les caractéristiques acoustiques sont données par un modèle développé empiriquement par Delaney et Bazley [7] (conçu pour des matériaux de construction fibreux, mais applicable également aux surfaces de type sol).

Ce modèle prend en compte d'autres effets tels que la turbulence, qui est combinée avec l'absorption atmosphérique. La méthode de calcul de l'atténuation atmosphérique est décrite dans les documents [2,6]. Il existe de légers écarts (autour de 1 dB) entre les valeurs issues de cette méthode et celles intégrées dans l'ISO 9613-1.

La divergence géométrique est similaire à celle de l'ISO 9613.

Dans cette méthode est enfin intégrée une pondération suivant l'ISO 226 [8] (lignes isosoniques) permettant de prendre en compte la perception humaine, sur laquelle on reviendra par la suite.

Ce modèle permet de rétro-propager, à partir d'un seuil (typiquement, le bruit de fond), des niveaux à ne pas dépasser à une certaine distance, comme on le verra par la suite. C'est grâce à cette méthode que la norme MIL-STD-1474 C (et D) a pu établir des limites de non détectabilité à l'oreille humaine pour deux bruits de fond considérés (dits normatifs par la suite). Inversement, il est possible de faire de la propagation avec ce modèle (en faisant la soustraction de l'atténuation sur le niveau global, en dB).

### 4.1 Bruit de fond

Il existe deux bruits de fonds normatifs : Level I et Level II.

Le Level I, appelé « Rural Area » est décrit comme étant un niveau typiquement trouvé dans des zones rurales éloignées mais proche des activités humaines. Ce niveau de bruit de fond est atteint au centre DGA-TT de Bourges et permet des acquisitions de signatures acoustiques adéquates pour l'estimation de la furtivité du véhicule en roulage. Le level II, appelé « Quietest Area », plus sévère, correspond au niveau le plus bas que l'on puisse trouver à une grande distance des activités humaines. Le tableau ci-dessous affiche les spectres en tiers d'octaves de chacun de ces deux bruits de fond.

Frequency (Hz)	Level I - Rural Area Ambient Noise Level (dB)	Level II - Quietest Area Ambient Noise Level (dB)
50	34	29
63	37	29
80	38	28
100	38	26
125	37	24
160	34	23
200	31	21
250	28	19
315	26	18
400	25	16
500	24	15
630	24	14
800	23	13
1000	22	12
1250	21	11
1600	19	10
2000	18	9
2500	16	8
3150	15	7
4000	14	7
5000	12	6
6300	10	6
8000	9	6
10000	8	6

Figure 6 : Bruits de fond normalisés

Le Level I étant le moins contraignant, il a été choisi pour établir les niveaux de non détectabilité (spectres seuils) pour une distance donnée. Ayant des valeurs de référence dans le document d'Aberdeen ainsi que dans la MIL-STD-1474 C/D, on peut valider l'outil, pour ensuite établir des niveaux de non détectabilité avec leurs distances associées selon nos besoins internes et ceux des opérationnels.

### 4.2 Pondération du bruit de fond

La pondération du bruit de fond est un moyen de simuler la perception de l'être humain à différentes bandes de fréquences. Un microphone conserve à peu près la même sensibilité à toutes les gammes de fréquences, tandis que l'oreille humaine est plus ou moins sensible à certaines gammes de fréquences (peu sensible aux basses fréquences, mais plutôt aux fréquences moyennes [500, 5000Hz]).

Une norme a été établie, l'ISO 226 [8], à partir de données empiriques, afin d'établir des courbes dites « isoniques », qui correspondent à une perception d'intensité égale sur le spectre audible (voir figure ci-dessous).

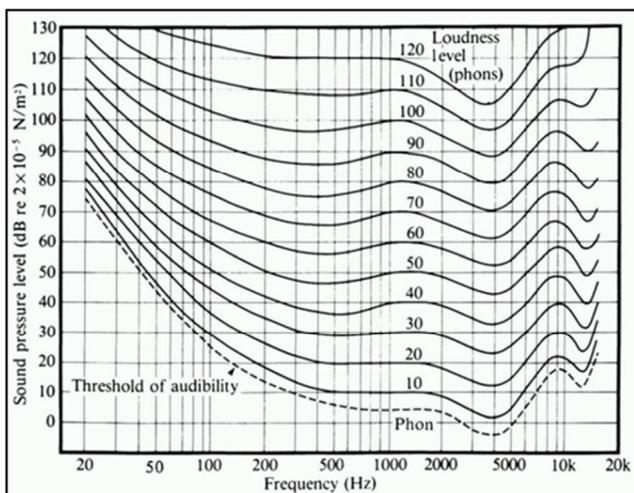


Figure 7 : Courbes d'isonies - ISO 226

De plus, une certaine intensité aura tendance à déborder sur les bandes de fréquences proches. Pour prendre en compte ce phénomène, l'Human Engineering

Laboratory d'Aberdeen a utilisé le filtre de Fidell, pour pondérer le bruit seuil (généralement un bruit de fond). Ce filtre permet de prendre en compte l'effet d'une bande de fréquences sur les deux bandes inférieures et les deux bandes supérieures sur l'oreille humaine par une somme pondérée des niveaux acoustiques de ces bandes autour de la bande centrale considérée. La relation suivante est appliquée :

$$L_A(i) = 10 \log_{10} \sum_{j=-2}^2 10^{\frac{L(i+j)}{10}} w(i,j) \quad (7)$$

avec  $w(i,j)$  : coefficients dont les valeurs sont renseignées dans le tableau suivant :

i	F(Hz)	W(Hz)	w(i,-2)	w(i,-1)	w(i,0)	w(i,1)	w(i,2)
1	50	133,0	0	0	1	1	0,5
2	63	115,9	0	0,53330	1	0,6683	0,45
3	80	105,7	0,3048	0,43550	1	0,5176	0,3846
4	100	100,8	0,1521	0,35650	1	0,3999	0,1321
5	125	98,7	0,07568	0,29170	1	0,309	0,04539
6	160	98,7	0,03776	0,23880	1	0,2388	0,0156
7	200	98,7	0	0,19500	1	0,1845	0
8	250	102,2	0	0,11596	1	0,1429	0
9	320	117,3	0	0,13060	1	0,1104	0
10	400	122,5	0	0,10690	1	0,08531	0
11	500	140,0	0	0,08750	1	0,06592	0
12	640	161,0	0	0	1	0	0
13	800	192,5	0	0	1	0	0
14	1000	231,0	0	0	1	0	0
15	1250	290,9	0	0	1	0	0
16	1600	366,1	0	0	1	0	0
17	2000	461,0	0	0	1	0	0
18	2500	580,3	0	0	1	0	0
19	3200	730,5	0	0	1	0	0
20	4000	919,8	0	0	1	0	0
21	5000	1157,9	0	0	1	0	0
22	6400	1457,5	0	0	1	0	0
23	8000	1835,2	0	0	1	0	0
24	10000	2310,1	0	0	1	0	0

Figure 8 : Valeurs des coefficients  $w(i,j)$

Une fois que tous les niveaux sont calculés, ils sont comparés à ceux de l'ISO 226, afin d'établir le seuil de détectabilité. Cela n'est donc valable que pour les fréquences où l'oreille humaine est particulièrement peu sensible, dans les autres cas, il faut rester en dessous du bruit de fond pour être non-détectable.

### 4.3 Rétro-propagation et établissement des limites

La propagation sonore d'une source est décrite ci-dessous, en prenant en compte un niveau acoustique  $L_1$  à une distance  $r_1$  de la source, et un niveau  $L_2$  à une distance  $r_2$  de la source :

$$L_2 = L_1 - 20 \log_{10} \left( \frac{r_2}{r_1} \right) - \alpha(r_2 - r_1) - A_{ge}(r_2) + A_{ge}(r_1)$$

Où  $20 \log_{10} \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$  représente la divergence géométrique, et  $\alpha(r_2 - r_1)$ , l'absorption atmosphérique.

L'effet de sol, noté ici  $A_{ge}$ , devant être calculé entre  $r_1$  et  $r_2$ , on prend l'effet de sol entre la source et  $r_2$  et on soustrait alors l'effet de sol entre la source et  $r_1$ .

Il suffit alors d'inverser les termes de l'équation pour obtenir le niveau  $L_1$  en fonction de  $L_2$ . C'est ainsi que le modèle d'Aberdeen parvient à fournir les niveaux limites de non détectabilité comme on le décrira dans le paragraphe suivant.

## 4.4 Rétro-propagation

La rétro-propagation est, de façon globale, l'inverse de la propagation. Au lieu de partir de niveaux mesurés à proximité de la source, pour obtenir des niveaux en champ lointain, on part de niveaux en champ lointain pour obtenir les niveaux associés à proximité de la source.

Pour comprendre l'intérêt du processus, il faut se rappeler que l'on est détectable lorsqu'on est au-dessus du bruit de fond et de la sensibilité de l'oreille humaine. Le bruit de fond peut donc être considéré comme un seuil à ne pas dépasser. Ce n'est alors plus un bruit de fond (qui est le même partout), mais un niveau seuil qu'il faut retrouver lorsqu'on propage un spectre (qui est ici l'inconnue). Il faut donc rétro-propager ce seuil pour estimer le spectre qui une fois propagé, fournira ce seuil. Ce spectre est la limite de non détectabilité, définie pour une distance de mesure donnée.

Cette démarche, suivant le modèle d'Aberdeen, est schématisée dans la figure ci-dessous.

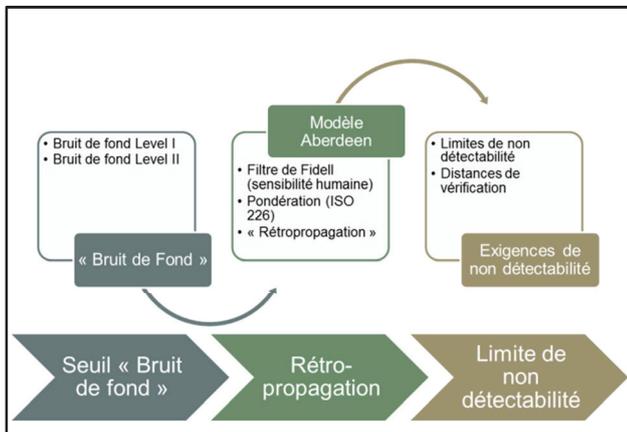


Figure 9 : Schéma de la démarche suivant le modèle d'Aberdeen

## 5 MIL-STD-1474

Comme dit précédemment, le modèle d'Aberdeen a conduit à la MIL-STD-1474D qui est la norme actuelle donnant les limites auditives de non détectabilité par l'oreille humaine pour le matériel militaire. Ce document, qui est désormais disponible au public, fournit des spectres à ne pas dépasser pour être non-détectable à des distances spécifiques. Destiné à être utilisé « sur le terrain », il permet de caractériser cette distance limite de furtivité acoustique pour les niveaux de bruit de fond, décrits précédemment, mais aussi des paramètres environnementaux donnés.

En outre cette norme américaine distingue les véhicules de plus de quatre tonnes des véhicules plus légers, et prévoit différentes procédures de tests (statique, vitesses de roulage en marche lente, positions des capteurs, ...) selon le type de matériel pris en compte (générateur, engin de chantier, véhicule lourd, ...).

## 6 Applications

Les méthodologies de propagation et de rétro-propagation ayant été établies, celles-ci ont été intégrées dans un outil interne par Nexter Systems. Elles permettent de propager des niveaux de bruit mesurés à une quelconque distance, mais surtout d'obtenir des niveaux limites de non détectabilité à partir d'un bruit de fond quelconque (normatif ou mesuré).

La figure suivante présente deux niveaux de bruits de fond (normatif et mesuré) ainsi que des spectres de signatures acoustiques d'un véhicule blindé terrestre (à titre d'illustration).

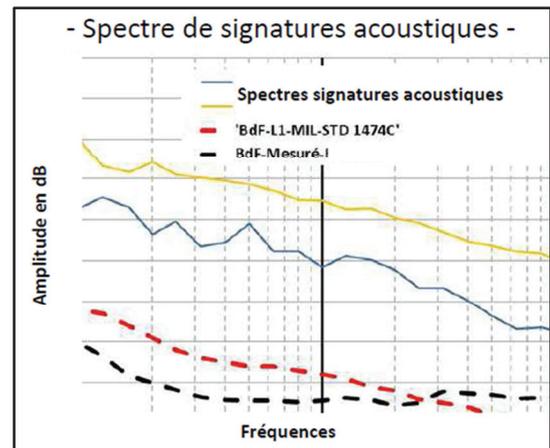


Figure 10 : exemples de spectres acoustiques



Figure 11 : Acquisition de signatures acoustiques d'un véhicule en roulage

### 6.1 Propagation de mesures

Pour propager des mesures, il faut d'abord renseigner les paramètres principaux, tels que : les hauteurs de la

source, du microphone, du récepteur (oreille), les distances entre la source et le microphone, la source et le récepteur, la température, le taux d'humidité, le type de sol (mou/dur via sa caractérisation G décrite auparavant).

Ensuite, l'utilisateur sélectionne la méthode de calcul (ISO 9613 ou Aberdeen), renseigne la présence ou pas de végétation dense, les spectres en bande d'octaves ou en tiers d'octaves.

## 6.2 Calcul de la distance de non détectabilité

Le programme peut aussi calculer la distance de non détectabilité acoustique suivant le bruit de fond choisi. Une fois les mesures et le bruit de fond saisis, on obtient après un calcul, la distance de non détectabilité du véhicule. Basé sur le même code de propagation, il converge par dichotomie vers la distance recherchée, en calculant à chaque fois les niveaux à chacune des distances, pour les comparer, et incrémenter, ou décrémenter l'intervalle de recherche pour converger finalement vers cette distance de non détectabilité. Il affiche, en même temps que la solution, la fréquence responsable de la détectabilité à l'itération précédente, et superpose le bruit de fond à la mesure propagée. La figure ci-dessous illustre ce principe.

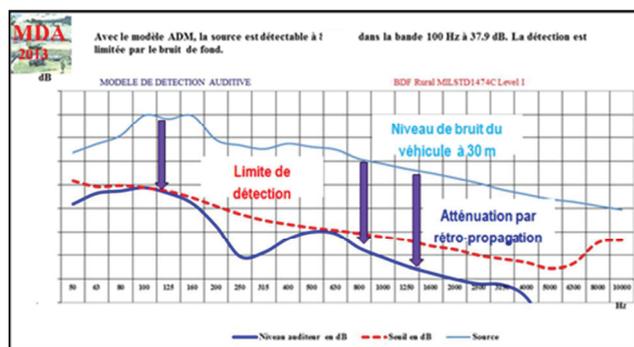


Figure 12 : Exemple de résultats fournis par le modèle de détection acoustique de DGA

## 7 Conclusions

La performance de furtivité acoustique d'un véhicule blindé permet au client de le positionner en fonction de la typologie de la mission attendue.

Aujourd'hui, les estimations des performances de furtivité acoustique d'un véhicule s'effectuent avec des conditions d'environnements et d'acquisitions des signatures acoustiques standards qui sont indiquées dans les normes MIL-STD 1474 [4] et STANAG 4318 [5].

Or comme indiqué dans ce document, la furtivité acoustique d'un véhicule dépend fortement de son environnement (bruit de fond, milieu ouvert, nature du sol, atmosphère) et de la sensibilité de l'oreille humaine (ISO 226 [8]).

Tout en gardant les acquisitions de signatures acoustiques en champ proche, ce type de modélisation et

d'outils permet de passer des conditions dites standards indiquées dans les normes aux conditions d'environnements réels spécifiées dans les exigences opérationnelles. Il est alors possible d'identifier les bandes de fréquences émergentes du véhiculé (liées à la typologie de la mission).

Ces informations sont pour l'industriel un moyen, parmi d'autres, d'identifier les sources acoustiques et les bandes de fréquences sur lesquelles il doit porter son attention.

Plus cette donnée est prise en compte en amont du cycle de développement, plus la démarche de conception silencieuse (caractérisation des sources, voies de passage aériennes et solidiennes, ...) permettra d'atteindre les performances attendues.

## Références

- [1] ISO 9613: Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre, 1993-1996.
- [2] « Proposed Aural Nondetectability Limits for Army Materiel », U.S Army Human Engineering Laboratory, Aberdeen, MD, 1985.
- [3] Nord2000. « Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model » Delta.
- [4] MIL-STD-1474D, 1997.
- [5] STANAG 4318 (Classifié, Diffusion Restreinte OTAN).
- [6] « American National Standard Method for the Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere », 1978, ANSI.
- [7] Acoustical characteristics of fibrous absorbent materials, Delany & Bazley, 1969-1970.
- [8] ISO 226, 2004.